

| UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" - FACULTAD TECNOLÓGICA | | |
|---|--|-------------------------------------|
| PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA | | |
| FORMATO DE PROYECTOS DE GRADO | | |
| Nº DE RADICACIÓN: _____ | | |
| INFORMACIÓN EJECUTORES | | |
| Ejecutor 1 | | |
| Nombre (s): | CRISTIAN CAMILO | |
| Apellido (s): | ALVARADO BUITRAGO | |
| Código: | 20171375021 | |
| E-mail: | Camealvarado5253@hotmail.com | |
| Teléfono fijo: | 2616650 | |
| Celular: | 3208182411 | |
| Ejecutor 2 | | |
| Nombre (s): | ANGIE ZULAY | |
| Apellido (s): | RUIZ BUITRAGO | |
| Código: | 20171375029 | |
| E-mail: | Angierui3@gmail.com | |
| Teléfono fijo: | 6041173 | |
| Celular: | 3057060782 | |
| INFORMACIÓN DEL PROYECTO | | |
| Título del Proyecto: | INFLUENCIA DEL TIEMPO DE TRATAMIENTO ISOTERMICO EN UN ACERO CON CONTENIDO DE SILICIO CERCANO AL 1,5% Y DEFORMADO PLASTICAMENTE EN 65% EN LA FORMACION DE BAINITA | |
| Duración (estimada): | 16 Semanas | |
| Tipo de Proyecto: (Marqué con una "x") | Innovación y Desarrollo Tecnológico | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Prestación y Servicios Tecnológicos | <input type="checkbox"/> |
| | Otro | <input type="checkbox"/> |
| Modalidad del Trabajo de Grado: | | |
| Línea de Investigación de la Facultad*: | Optimización de procesos industriales | |
| Línea de Investigación del Proyecto Curricular**: | Materiales y procesos de manufactura | |
| Grupo de Investigación: | | |
| Proyecto de Investigación: | | |
| Áreas del conocimiento que involucra: | Metalografía, materiales | |
| INFORMACIÓN PASANTÍA | | |
| Nombre de la empresa: | | |
| Dirección: | | |
| Teléfonos: | | |
| Correo electrónico: | | |
| Página Web: | | |
| INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA | | |
| Director: (Vo. Bo.) | Ing. Carlos Arturo Bohórquez | |
| Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.) | | |
| Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo.) | | |

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE TRATAMIENTO ISOTERMICO EN
UN ACERO CON CONTENIDO DE SILICIO CERCANO AL 1,5% Y
DEFORMADO PLASTICAMENTE EN 65% EN LA FORMACION DE
BAINITA

ANGIE ZULAY RUIZ BUITRAGO

CRISTIAN CAMILO ALVARADO BUITRAGO

ANTEPROYECTO

Tutor: Ing. Carlos Arturo Bohórquez

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

FACULTAD TECNOLOGICA

INGENIERIA MECANICA

2018

0. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos productos y la evolución de otros exigen mayores estándares de calidad en las materias primas de cualquier producto del mercado. Por esto se requiere que cualquier material empleado para su elaboración deba cumplir ciertas especificaciones desde diversos puntos de vista, como lo son las propiedades mecánicas y químicas del mismo. En los aceros, por lo general siempre se intenta el aumento de facultades que permitan a bajo costo disminuir la complejidad del diseño; un ejemplo es la capacidad estructural donde se buscan materiales con excelente resistencia y tenacidad con el fin de no necesitar grandes secciones de material. Todo esto siempre debe ser pensado con criterios económicos racionales que den una mayor competencia del producto en el mercado final para que siga siendo asequible para el consumidor. Gracias a lo anterior, se pretende fabricar un acero específico, con bajos costos de manufactura y con alto impacto a nivel industrial y comercial.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria metalúrgica actual, existen los aceros bainíticos, que son creados a partir de tratamientos termomecánicos y con variaciones en el porcentaje de elementos aleantes en su composición química. No obstante, estos presentan aún muchas desventajas ante otros aceros fabricados por procesos convencionales y gracias a ello siguen siendo motivo de estudio a nivel mundial. En este proyecto se pretende analizar el cambio generado en su composición química y a través de su tratamiento termomecánico.

1.1. ESTADO DEL ARTE

Desde el descubrimiento de los materiales metálicos y en especial, la creación de los aceros al carbono, este ha sido el más universal y exitoso de todos, gracias a sus innumerables aplicaciones, su fácil obtención en el mercado y su bajo costo tanto de producción como de adquisición.

Con el paso de los años, por medio de los avances tecnológicos, estudios y experimentos científicos, han nacido nuevos materiales, con aleaciones de diferentes tipos, con propiedades químicas y mecánicas muy diversas, lo que permite una gran variedad de opciones a escoger en dicho ejemplar, dependiendo la aplicación para la que se necesita.

Los primeros en indagar en la bainita, fueron Davenport y Bain. Este descubrimiento surgió al ser observada por estos dos científicos, quienes se percataron de que aquella forma era muy diferente a la martensita o a la perlita que puede presentar un metal. Así, determinaron que es una microestructura en

forma de láminas, creada a partir la transformación isotérmica de la austenita, donde se suprimen en gran cantidad los carburos presentes en el material [1].

Posteriormente, el PhD. Harry Badeshia, profesor de la universidad de Cambridge, realizó un sinnúmero de estudios relacionados con materiales aleados, entre los cuales se encuentran los aceros bainíticos. Estos no han sido fáciles de establecer en la industria por la presencia de algunas falencias en sus propiedades, razón por la cual hace de estos materiales, tema aun de frecuentes estudios para lograr en algún momento el desarrollo de un súper aleado y llegar a conseguir los anhelados resultados [2].

En el año 2009, Maria Jesus Santofimia Navarro, de la universidad Complutense de Madrid, en su tesis doctoral realiza un análisis profundo de los aceros bainíticos libres de carburos. Allí resalta la importancia del tratamiento isotérmico en el metal para lograr la transformación requerida en la microestructura. “Mediante el uso de diferentes técnicas experimentales tales como la dilatometría, la resistividad eléctrica, medidas magnéticas y la observación metalográfica se ha comprobado en un amplio grupo de aceros que existe una temperatura bien definida, por encima de la cual no se puede formar bainita. La cantidad de bainita que se forma a temperaturas inferiores a la temperatura “Bs” aumenta a medida que disminuye la temperatura de transformación y, para una temperatura de transformación dada, aumenta de forma sigmoïdal con el tiempo hasta alcanzar un valor asintótico, el cual no cambia en tratamientos prolongados, incluso cuando quedan cantidades sustanciales de austenita sin transformar.” [3] .

Más adelante, en el año 2013, Juan Cornide, también estudiante de la universidad Complutense de Madrid, en su tesis doctoral también explica que “la transformación bainítica es una transformación displaciva, donde la nueva fase se forma con una correspondencia directa con la red cristalina de la fase de la que proviene, y por una deformación de plano invariante con una componente de cizalla. Sin embargo, todavía existe una gran discusión sobre el papel que juega el Carbono en los procesos de crecimiento de la bainita. De esta forma, el debate actual sobre la transformación bainítica se centra en si la bainita crece sobresaturada en Carbono, cómo afirma la teoría, y los procesos de difusión de Carbono, no inhibidos a las temperaturas de transformación bainítica, provocan la descarburación de la ferrita y el correspondiente enriquecimiento de la austenita adyacente; o por el contrario, la bainita crece bajo condiciones de equilibrio, cómo afirma la teoría difusional, y su crecimiento está controlado por la velocidad a la cual el Carbono puede difundir a través de la interfase, de forma análoga a la transformación Widmanstätten, con la única diferencia que durante la reacción bainítica se produce la precipitación de carburos delante de la interfase.” [4]

Lo anterior es complementado por la explicación que hace Santofimia acerca del fenómeno de reacción incompleta, donde afirma que es otra de las evidencias

para la aceptación de la teoría displaciva de la transformación bainítica frente a la reconstructiva. Una vez que ha comenzado la transformación bainítica, ésta tiene lugar mediante la nucleación sucesiva de subunidades de bainita sobresaturadas en carbono hasta que alcanzan un tamaño determinado. Inmediatamente después, la subunidad expulsa el carbono excedente a la austenita de alrededor. Esta transformación continúa, enriqueciendo progresivamente en carbono la austenita residual mientras que el cambio de energía libre sea favorable [3].

Así, se puede asegurar que “cada placa de bainita nuclea involucrando procesos de difusión de carbono en condiciones de paraequilibrio y crece adifusionalmente sobresaturada en carbono, para inmediatamente después expulsar el exceso de carbono a la austenita residual. La siguiente placa de bainita nuclea y crece a partir de una austenita enriquecida en carbono, en mayor o menor medida dependiendo de si ha habido precipitación o no de carburos en las placas de bainita o en la austenita residual. Este proceso de nucleación y crecimiento se detiene cuando la concentración en carbono de la austenita alcanza contenidos máximos correspondientes a la composición química determinada. Efectivamente, la reacción queda “incompleta” pues la austenita no alcanza su composición de equilibrio”. Con base en todo lo anterior, y teniendo en cuenta dichas teorías y fenómenos, “las subunidades de bainita crecen de modo adifusional y sobresaturadas en carbono hasta alcanzar un tamaño final. Si todo este carbono es expulsado a la austenita residual, la microestructura bainítica obtenida es bainita superior. Sin embargo, a bajas temperaturas de transformación o ante elevadas concentraciones de carbono, se puede favorecer la precipitación de carburos (generalmente, cementita) dentro de la subunidad de ferrita bainítica, antes de que se produzca la expulsión total de carbono a la austenita residual. En tal caso, la microestructura bainítica corresponde a bainita inferior”, explica Santofimia [3].

Juan Cornide, en su tesis, afirma que uno de los problemas más grandes en los aceros bainíticos, que afectan fuertemente la tenacidad del material, es la presencia de “partículas groseras de cementita gracias a su baja solubilidad”, las cuales se evitan agregando cantidades cercanas al 1,5% en peso de Silicio en el acero aleado. Esta adición retrasa la precipitación de la austenita residual tras la formación de bainita en la estructura, mientras que el Carbono es expulsado como consecuencia de la formación de bainita y enriquece dicha austenita estabilizándose así hasta la temperatura ambiente. El resultado de lo anterior es una microestructura formada por placas muy finas de bainita, separadas por regiones de austenita en forma de láminas enriquecidas en Carbono [4].

Esta hipótesis ha sido investigada mediante el cálculo del diagrama de fases de paraequilibrio correspondiente a la coexistencia de austenita y cementita por Bhadeshia utilizando MTDATA, que es un algoritmo de minimización de la energía libre de Gibbs que trabaja en conjunción con una base de datos [2].

Debido a esto, en este proyecto se pretende desarrollar un acero con microestructura de bainita superior compuesta de bainita y asutenita retenida y totalmente libre de carburos, gracias al Silicio, que se pretende sea inhibidor de la cementita en el proceso, evitando la aparición de dichas partículas con la precipitación de los carburos que se puedan presentar y aunque, Cornide asegura que “la microestructura de bainita libre de carburos no satisface en algunas ocasiones todas sus expectativas gracias a la inestabilidad de la austenita cuando se presenta en la microestructura en forma de grandes bloques atrapados entre las plumas de bainita”, con el silicio se pretende estabilizar la austenita residual hasta temperatura ambiente obteniendo finalmente austenita retenida.

Las láminas de austenita que se encuentran dispersas en la bainita, según Cornide, juegan un papel bastante importante si se habla de la ductilidad del acero gracias a su contenido de Carbono, gracias a que permiten alcanzar valores significativos de alargamiento en el aumento progresivo del endurecimiento por trabajado del material [4]. Esto se debe a la austenita se convierte en martensita bajo la acción de la deformación plástica del material (TRIP). Así mismo, este efecto, influye directamente en la tenacidad y dureza del material.

El observatorio tecnológico del metal OTEA, en una de sus publicaciones, explica el efecto TRIP como la aparición de una fase dura entorno a la ferrita que crea un endurecimiento por deformación plástica. Sin embargo, en los TRIP la austenita retenida también se transforma progresivamente en martensita con el aumento de la tensión, con lo cual aumenta aún más la dureza. En los TRIP también interviene la velocidad de deformación, factor muy importante para las propiedades que afectan a la resistencia al impacto.

El nivel de austenita retenida que se transforma en martensita dependerá del contenido de carbono. A bajos niveles de carbono, la austenita retenida empezará a transformarse inmediatamente bajo deformaciones. A altos niveles de carbono la austenita retenida será más estable y se transformará con niveles de esfuerzos mayores. Este será la causa de que este material tenga una excelente capacidad para absorción del impacto, e ira aumentando conforme aumente la deformación.

Asdrubal Valencia, profesor de la Universidad de Antioquia, también ha incursionado bastante en la producción de nuevos aceros con características predeterminadas, argumentando que “una de las manera de aumentar esta tasa de endurecimiento por deformación es introducir partículas que sean efectivas anclando las dislocaciones. Otro método es hacer que la deformación local induzca la formación local de martensita, lo cual a su vez aumentará la resistencia evitando la inestabilidad plástica, siendo esta una transformación inducida por el flujo plástico.

Valencia hace referencia a un experimento realizado por Zackay en 1987, donde tenían un acero con contenido de Si del 1,9%, este fue homogenizado a 1120° C durante una hora, luego enfriado a temperatura ambiente, y finalmente deformado en un 80% a 450° C con enfriamiento hasta -196° C. Este tratamiento tenía como propósitos producir una dispersión fina de carburos y una elevada densidad de dislocaciones en la matriz, y también demostrar la pérdida de Carbono de la solución sólida al precipitar de esta manera. Se procedió a deformar a temperatura ambiente y el flujo local indujo martensita, por tanto los valores de tensión estaban por encima de los correspondientes a aceros convencionales templados y revenidos, con alargamientos considerables.

Los resultados también demostraron que la composición química, y en particular el contenido en Carbono, es uno de los factores más influyentes en la estabilidad mecánica de la austenita. La presencia de austenita de muy diferentes tamaños con un amplio rango de composiciones de Carbono facilita la formación continua y progresiva de martensita por efecto TRIP, permitiendo distribuir el efecto de la transformación a un mayor grado de deformación y así posponer la presencia de grandes cantidades de martensita en estados muy iniciales de deformación [5].

En la universidad Nacional de Colombia, Msc Mauricio Alejandro Cetina, realizó, para optar a su título de Maestro en materiales, un proceso de caracterización de un acero bainítico con un atenuante en el elemento Boro como aleante en el metal, iniciando desde su proceso de fundición. El contenido de Silicio en tal material fue elevado (cerca del 1,5%) con el fin de retardar la precipitación cementita como fue explicado anteriormente. Así mismo, realizó un proceso termomecánico, donde deformó plásticamente el material, comprobando al final las ya explicadas ventajas que tiene una transformación TRIP en las propiedades mecánicas del material, junto con el Boro como elemento aleante.

Al final del proyecto, Cetina obtuvo un acero libre de carburos con altas propiedades mecánicas comparables con las de los aceros de alta resistencia, concluyendo en que estos nuevos materiales hacen parte de los nuevos aceros con usos específicos y con un campo de ductibilidad apreciable [6].

Con base en todo lo anterior, se decide realizar una deformación plástica al material después de fundido en un 65%, con el fin de demostrar todo lo expuesto por los expertos en el tema, añadiendo un tratamiento isotérmico a 450° C y variando en dos valores los tiempos de permanencia en dicha temperatura, con el fin de determinar la influencia de dichos tiempos en las características finales de la aleación.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existe un amplio abanico de materiales con excelentes propiedades, lo que ha hecho que el estudio de nuevos aceros sea tendencia desde hace muchos años. Estos aceros “avanzados” deben ofrecer una combinación de ventajosas características como son la resistencia, dureza, templabilidad, plasticidad, durabilidad y bajo coste de manufactura. Estos desarrollos se han realizado modificando y mejorando su micro estructura mediante procesos que se caracterizan por usar diferentes técnicas existentes de hace muchos años. Allí se pretende la adición de componentes aleantes y el uso de tratamientos termo mecánicos para lograr este fin establecido. Es así como nacen los aceros bainíticos, caracterizados por su alto grado de resistencia mecánica, su ductibilidad y en menor proporción su tenacidad. Estos últimos, han sido motivo de estudio desde su descubrimiento, siempre con el fin de mejorar sus falencias y pretendiendo posicionarlos como materiales competitivos y comerciales a nivel industrial.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia en la formación de bainita del tiempo de tratamiento isotérmico en un acero deformado plásticamente en 65% y con contenido de Silicio cercano al 1,5% en peso.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Calcular el balance de carga para obtener la composición química deseada y posteriormente fundir el acero.
- Realizar el análisis químico, cálculo de temperaturas críticas para establecer la secuencia de tiempos y temperaturas y así realizar la deformación plástica y el tratamiento isotérmico.
- Caracterizar el acero aleado obtenido mediante técnicas de microscopía óptica, SEM, DRX y dureza, y establecer la formación de las fases.

3. MARCO TEORICO

3.1. EL ACERO Y SU COMPOSICIÓN

Un acero, es una aleación de hierro con pequeñas cantidades de materiales que por sí solo, posee en su microestructura cristales de ferrita únicamente, razón por la cual el material es poco resistente a deformaciones plásticas. Mediante pocas adiciones de diferentes elementos en su composición química y diferentes tratamientos, dichos cristales de ferrita cambian de fase de tal forma que se crean estructuras cristalinas diferentes que permiten un gran incremento en una o varias de las propiedades mecánicas del material.

Una forma alotrópica se presenta cuando una misma sustancia o compuesto difiere porque los átomos se agrupan en diferentes estructuras. En un artículo publicado por la Universidad Autónoma de Manizales, se definen las formas alotrópicas del acero en fases alfa, beta, gama y delta de la siguiente manera:

El hierro cristaliza en la fase **alfa** hasta la temperatura de 768°C. La red espacial a la que pertenece es la red cúbica centrada en el cuerpo (BCC). La distancia entre átomos es de 2.86 Å. El hierro alfa no disuelve prácticamente en carbono, no llegando al 0.008% a temperatura ambiente, teniendo como punto de máxima solubilidad a T=723°C (0,02%).

La fase **beta** existe de 768°C a 910°C. Cristalográficamente es igual a la alfa, y únicamente la distancia entre átomos es algo mayor: 2.9 Å a 800°C y 2905°C a 900°C.

La fase **gamma** se presenta de 910°C a 1400°C. Cristaliza en la estructura FCC. El cubo de hierro gamma tiene más volumen que el de hierro alfa. El hierro gamma disuelve fácilmente en carbono, creciendo la solubilidad desde 0.85% a 723°C hasta 1.76% a 1130°C para decrecer hasta el 0.12% a 1487°C. Esta variedad de Fe es no magnética.

La fase **delta** se inicia a los 1400°C, observándose, entonces una reducción en el parámetro hasta 2.93Å, y un retorno a la estructura BCC. Su máxima solubilidad de carbono es 0.007% a 1487°C. Esta variedad es poco interesante desde el punto de vista industrial. A partir de 1537°C se inicia la fusión del Fe puro [7].

3.2. TIPOS DE MICRO ESTRUCTURAS EN LOS ACEROS

3.2.1. FERRITA

La ferrita es una solución sólida de carbono en hierro alfa, en la cual su solubilidad a la temperatura ambiente es tan pequeña que no llega a disolver ni un 0.008% de C. Es por esto que prácticamente se considera la ferrita como hierro alfa puro. La ferrita es el más blando y dúctil constituyente de los aceros. Cristaliza en una estructura BCC. Tiene una dureza de 95 Vickers, y una resistencia a la rotura de 28 Kg/mm², llegando a un alargamiento del 35 al 40%. Además de todas estas características, presenta propiedades magnéticas. En los aceros aleados, la ferrita suele contener Ni, Mn, Cu, Si, Al en disolución sólida sustitucional. Al microscopio aparece como granos monofásicos, con límites de grano más irregulares que la austenita. El motivo de esto es que la ferrita se ha formado en una transformación en estado sólido, mientras que la austenita, procede de la solidificación.

3.2.2. CEMENTITA

La cementita es un carburo de hierro y por tanto su composición es de 6.67% de C y 93.33% de Fe en peso. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros, alcanzando una dureza de 960 Vickers. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño y es magnética hasta los 210°C, temperatura a partir de la cual pierde sus propiedades magnéticas.

3.2.3. PERLITA

La perlita es un constituyente compuesto por el 86.5% de ferrita y el 13.5% de cementita, es decir, hay 6.4 partes de ferrita y 1 de cementita. La perlita tiene una dureza de aproximadamente 200 Vickers, con una resistencia a la rotura de 80 Kg/mm² y un alargamiento del 15%. Cada grano de perlita está formado por láminas o placas alternadas de cementita y ferrita. Esta estructura laminar se observa en la perlita formada por enfriamiento muy lento. Si el enfriamiento es muy brusco, la estructura es más borrosa y se denomina perlita sorbítica. Si la perlita laminar se calienta durante algún tiempo a una temperatura inferior a la crítica (723 °C), la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, recibiendo entonces la denominación de perlita globular.

3.2.4. AUSTENITA

La austenia es el constituyente más denso de los aceros, y está formado por la solución sólida, por inserción, de carbono en hierro gamma. La proporción de C disuelto varía desde el 0 al 1.76%, correspondiendo este último porcentaje de máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C. La austenita en los aceros al

carbono, es decir, si ningún otro elemento aleado, empieza a formarse a la temperatura de 723°C. También puede obtenerse una estructura austenítica en los aceros a temperatura ambiente, enfriando muy rápidamente una probeta de acero de alto contenido de C a partir de una temperatura por encima de la crítica, pero este tipo de austenita no es estable, y con el tiempo se transforma en ferrita y perlita o bien cementita y perlita.

Excepcionalmente, hay algunos aceros al cromo-níquel denominados austeníticos y comercialmente denominados como inoxidable, cuya estructura es austenítica a la temperatura ambiente. La austenita está formada por cristales cúbicos de hierro gamma con los átomos de carbono intercalados en las aristas y en el centro. La austenita tiene una dureza de 305 Vickers, una resistencia de 100 Kg/mm² y un alargamiento de un 30 % y no presenta propiedades magnéticas.

3.2.5. MARTENSITA

Bajo velocidades de enfriamiento bajas o moderadas, los átomos de C pueden difundirse hacia afuera de la estructura austenítica. De este modo, los átomos de Fe se mueven ligeramente para convertir su estructura en una tipo BCC. Esta transformación gamma-alfa tiene lugar mediante un proceso de nucleación y crecimiento dependiente del tiempo (si aumentamos la velocidad de enfriamiento no habrá tiempo suficiente para que el carbono se difunda en la solución y, aunque tiene lugar algún movimiento local de los átomos de Fe, la estructura resultante no podrá llegar a ser BCC, ya que el carbono está "atrapado" en la solución). La estructura resultante denominada martensita, es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Esta estructura reticular altamente distorsionada es la principal razón para la alta dureza de la martensita, ya que como los átomos en la martensita están empaquetados con una densidad menor que en la austenita, entonces durante la transformación (que nos lleva a la martensita) ocurre una expansión que produce altos esfuerzos localizados que dan como resultado la deformación plástica de la matriz.

Después de la cementita, la martensita es el constituyente más duro de los aceros y se presenta en forma de agujas y cristaliza en la red tetragonal. La proporción de carbono en la martensita no es constante, sino que varía hasta un máximo de 0.89% aumentando su dureza, resistencia mecánica y fragilidad con el contenido de carbono. Su dureza está en torno a 540 Vickers, y su resistencia mecánica varía de 175 a 250 Kg/mm² y su alargamiento es del orden del 2.5 al 0.5%.

3.2.6. BAINITA

Se forma la bainita en la transformación isotérmica de la austenita, en un rango de temperaturas de 250 a 550°C. El proceso consiste en enfriar rápidamente la austenita hasta una temperatura constante, manteniéndose dicha temperatura hasta la transformación total de la austenita en bainita.

3.2.7. LEDEBURITA

La ledeburita no es un constituyente de los aceros, sino de las fundiciones. Se encuentra en las aleaciones Fe-C cuando el porcentaje de carbono en hierro aleado es superior al 25%, es decir, un contenido total de 1.76% de carbono [7].

3.3. ACEROS BAINITICOS

La microestructura de la bainita consiste en listones o placas nucleados en los límites de grano austenítico, al igual que en las transformaciones de fase difusiva. La fase bainítica está conformada por listones o placas paralelas.

El estudio de la transformación bainítica se ha visto limitado algunas veces debido al tamaño de las unidades micro-estructurales, ya que la placa observada en el microscopio óptico es en realidad una pluma bainítica formada por varias subunidades; este tamaño reducido se debe principalmente a las temperaturas de transformación, que afectan la difusión del carbono, y a la precipitación de películas de cementita en los límites entre las subunidades, que impiden su crecimiento [8].

La complejidad de la microestructura bainítica ha dado lugar a la existencia de multitud de terminologías para representar su morfología, lo que ha conducido a cierta confusión. Por ejemplo, se denomina ferrita bainítica (α_b) a la fase ferrita cuando se encuentra en forma de subunidad de bainita. Las subunidades de ferrita bainítica pueden contener partículas de cementita en su interior, que da lugar a la denominada bainita inferior. Si, por el contrario, la ferrita bainítica está libre de partículas de cementita, la microestructura bainítica se denomina bainita superior. La bainita superior se forma a mayores temperaturas que la inferior [9].

Así mismo, mediante el proceso isotérmico de la austenita se forma una microestructura compuesta por placas o lascas de ferrita y una segunda fase que puede ser cementita, austenita o martensita, dependiendo de la composición química del acero y la temperatura de transformación. Este constituyente de transformación intermedia es comúnmente conocido como bainita. Davenport y Bain descubrieron esta microestructura cuando estudiaban la descomposición isotérmica de la austenita. La bainita también se puede obtener a partir de tratamientos anisotérmicos a velocidades intermedias, demasiado rápidas para formar perlita y muy lentas para producir martensita [8] y [9].

3.4. EFECTO DEL SILICIO EN LA MICROESTRUCTURA BAINITICA

El silicio es el elemento más abundante sobre la tierra y se utiliza siempre como material aleante en materiales de diferente índole con el fin de dar mayor resistencia. El silicio de tipo metalúrgico con pureza del 98 – 99 % se utiliza como materia prima para fabricar compuestos organosilícicos, elastómeros y aceites. Este, también tiene una gran variedad de usos gracias a sus propiedades semiconductoras, es decir en el ámbito electrónico tiene un gran aprecio para la fabricación de diferentes circuitos y componentes.

Este metaloide tiende a disolverse en ferrita aumentando la resistencia del acero, sin disminuir mucho la ductilidad. Promueve la desoxidación del acero líquido a través de la formación de dióxido de silicio, tendiendo así a dar mayor solidez en la pieza fundida, es por ello que el Si resulta fundamental en los aceros fundidos.

Por otra parte, el Silicio resulta como inhibidor en la formación de cementita en los aceros aleados, retardando la aparición de ésta cuando de un tratamiento térmico se trata. Gracias a la aparición de partículas grandes de cementita en los aceros bainíticos expuestos a tratamientos termo mecánicos, y siendo este un tema que afecta enormemente a la tenacidad que puede presentar el material, se ha estudiado la forma de la no creación de estas partículas de gran tamaño, y es incluyendo en el material aleante, con cantidades de Silicio cercanas al 1,5% en peso.

Estas desventajas que presentan estas características, resultan poco benéficas para el material, si lo comparamos con aceros convencionales con tratamientos de recocidos y revenidos para mejorar sus propiedades, y por lo cual, aun no es posible posicionar el paquete bainítico en el mercado metalúrgico actual.

3.5. DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Una deformación plástica sucede cuando un material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada, esto sucede porque el material supera su límite de fluencia (punto que divide la zona elástica y plástica del material).

3.5.1. PROCESOS DE CONFORMADO

Los procesos de conformado plástico se clasifican según el tipo fuerza que es aplicada sobre la pieza de trabajo, tales como procesos de compresión directa e indirecta, procesos tipo tensión, procesos de doblado y procesos de corte [10].

PROCESOS TIPICOS DE CONFORMADO DE MATERIALES

3.5.1.1. Laminado de metales

Esta se da cuando el metal es forzado a pasar a través de rodillos, siendo sujeto a altos esfuerzos de compresión como resultado de la fricción entre los rodillos y la superficie del material. El proceso de laminado se puede dividir en laminado en frío y laminado en caliente. El primero da un buen acabado superficial, un buen control dimensional pero no es posible un alto porcentaje de reducción. En cuanto a la laminación en caliente este si ofrece porcentajes altos de reducción, pero acabado superficial de baja calidad y un limitado control dimensional.

En el proceso de laminación surgen problemas y defectos que dependen principalmente de la interacción de los rodillos con el material de trabajo [10].

3.5.1.2. Proceso de forja

Es el proceso para darle utilidad a un metal, moldeándolo, perfeccionándolo, en otras palabras, mejorar sus propiedades mecánicas, por medio de un proceso de deformación plástica controlada por impacto o presión.

El proceso de forja es competitivo y de bajo costo si se compara con otros procesos de manufactura. La calidad del material es una de sus principales ventajas pues a partir de la colada, se elaboran las palanquillas, estas son laminadas en caliente, este proceso da al material una estructura con granos pequeños y alargados, que se orientan en el sentido de la laminación. A esto se le conoce como fibras de material.

Gracias a la orientación y al refinamiento de los granos, se produce una uniformidad del material, la cual aporta una mejor respuesta a los tratamientos térmicos. Esto conlleva a que en el material forjado se pueda desarrollar la máxima resistencia con la mínima variación de propiedades entre pieza y pieza.

La forja asegura la eliminación de burbujas de gas o vacíos, que podrían causar una falla inesperada, las piezas elaboradas bajo este proceso son calentadas, prensadas, dobladas y tensionadas, por lo cual, cualquier defecto interno será sellado y corregido, las deformaciones internas rara vez se presentan [10].

3.5.1.3. Extrusión

Este proceso consiste en hacer pasar un bloque de material (billet) a través de un orificio mediante presiones elevadas, existen dos tipos principales de extrusión, la directa y la indirecta, donde la diferencia radica en la dirección de viaje del material, es decir, en un proceso se mueve el billet y en el otro se mueve la matriz.

Existen otros tipos de clasificaciones como lo son por temperatura, en caliente o en frío, o por equipo, si es horizontal o vertical. La extrusión en frío se lleva a

cabo a temperatura ambiente o a temperaturas ligeramente elevadas, muchos materiales pueden ser extruidos en frío, tal como: aluminio, estaño, plomo, cobre, titanio, entre otros. Entre sus ventajas se encuentran que no hay oxidación, buenas propiedades mecánicas debido a la deformación en frío y buen acabado superficial usando buenos lubricantes. Cuando el proceso se realiza en caliente las temperaturas son bastante elevadas, aproximadamente entre el 50 y el 75% del punto de fusión. El rango de presión oscila entre los 35 a 700 MPa. El proceso de extrusión en caliente más común es el de extrusión Directa y debido a la exposición a altas temperaturas hay detrimento de la vida útil de la matriz [10].

3.5.1.4. Trefilado

El trefilado consiste en hacer pasar una varilla o un alambre a través de una hilera o dado. En este proceso el flujo plástico es causado por las fuerzas de compresión que actúan sobre el material de trabajo. Una condición es que el material debe tener alta ductilidad y buena resistencia a la tensión, esté proceso normalmente se lleva a cabo a temperatura ambiente, excepto para grandes deformaciones, las cuales se pueden realizar alcanzando aumentos en la temperatura. Usualmente el material tiene geometría circular.

En los equipos de trefilado los montajes se hacen a través de “trenes” de trefilado en los cuales se hace pasar el alambre hasta el diámetro requerido, no solo se utilizan dados, también rodillos. Generalmente a alambres ferrosos y no ferrosos se les realiza un tratamiento térmico de RECOCIDO. En aceros con contenidos superiores a 0.25%C, se realiza un tratamiento térmico de PATENTADO antes de comenzar el trefilado, este tratamiento ha incrementado la reducción hasta casi un 90% [10].

3.6. TRATAMIENTOS TERMICOS

Los tratamientos térmicos constan de procesos de calentamiento y posterior enfriamiento con tiempos determinados en cuanto a la temperatura y permanencia con el fin de poder modificar su estructura y mejorar así su rango de aplicación. Este tipo de modificación solo altera la forma en que se solidifica el mismo, específicamente lo que concierne a la forma en que se ubican sus estructuras cristalinas, que a su vez altera las propiedades mecánicas. No alteran su composición química pues el material base es el mismo. Es posible realizar un tratamiento parcial sobre una superficie específica del material iniciando en su manufactura o cuando este está totalmente terminado, en el primer caso se pretende ablandar el metal y mantenerlo a una temperatura elevada con el fin de que sea más fácil de trabajarlo mientras se lleva a cabo su producción, en el segundo el tratamiento se realiza una vez constituida la pieza de trabajo final cumple la función de aliviar efectos de endurecimiento por deformación o llevar a cabo un aumento de su resistencia y dureza [11].

3.6.1. ETAPAS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO

Un tratamiento térmico consta de tres etapas que son necesarias para lograr un cambio en la microestructura del material:

- Calentamiento hasta la temperatura fijada: se le da al material una elevación uniforme de temperatura.
- Permanencia a la temperatura fijada: Su fin es la completa transformación del constituyente estructural de partida. Puede considerarse suficiente una permanencia de unos 2 minutos por milímetro de espesor.
- Enfriamiento: Este enfriamiento tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de tratamiento que se realice, puede darse a temperatura ambiente o dentro de la mufla, esto depende del material y del tipo de tratamiento que se le esté realizando [11].

Tipos de tratamientos térmicos

Los distintos tipos de tratamientos térmicos basan su utilización en las transformaciones estructurales que se llevan a cabo en el acero, llamadas “transformaciones alotrópicas”, al igual que los procesos de recristalización y de difusión.

Se pueden clasificar en cuatro grupos principales:

3.6.1.1. Recocido

Es un tratamiento térmico que consiste en llevar un material metálico a una temperatura elevada durante largo tiempo, con el objetivo de bajar la densidad de dislocaciones y, de esta manera, impartir ductilidad.

El Recocido se realiza principalmente para:

- Cambiar la estructura del material y obtener las propiedades mecánicas deseadas, ablandando el metal y mejorando su maquinabilidad.
- Recristalizar los metales trabajados en frío.
- Para aliviar los esfuerzos residuales.

Las operaciones de Recocido se ejecutan algunas veces con el único propósito de aliviar los esfuerzos residuales en la pieza de trabajo causadas por los procesos de formado previo [11] y [12].

3.6.1.2. Normalizado

El normalizado también llamado perlitzación, tiene como finalidad obtener la estructura perlítica de grano fino y distribución homogénea las cuales corresponden a las propiedades mecánicas óptimas del acero perlítico, este tipo de tratamientos se realiza principalmente sobre aceros hipoeutectoides. Se suelen someter a normalizado piezas que han sufrido trabajos en caliente, en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos y también se utiliza en aquellos casos en los que se desean eliminar los efectos de un tratamiento anterior defectuoso.

“La normalización suele usarse para mejorar la maquinabilidad, modificar y refinar las estructuras dendríticas de piezas de fundición, y refinar el grano y homogenizar la microestructura para mejorar la respuesta en las operaciones de endurecimiento” [12].

3.6.1.3. Temple

Este es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en Austenita con el calentamiento y después, por medio de una caída de temperatura acelerada (con aceites, agua o salmuera), se convierte en Martensita. En el temple, es importante la fase de enfriamiento y la velocidad alta del mismo, además, la temperatura para el calentamiento óptimo debe ser siempre superior a la crítica para poder obtener de esta forma la Martensita. Existen diferentes tipos de Temple, lo cuales se clasifican por el resultado que se quiera obtener y en función de la propiedad que presentan casi todos los aceros, llamada Templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del acero [11] y [12].

3.6.1.4. Revenido

El revenido es un tratamiento que complementa al temple, con este tratamiento se disminuye la dureza y fragilidad elevada, sin perder demasiada tenacidad. El tratamiento de revenido controla las propiedades físicas del acero. “Este tratamiento térmico consiste en calentar el acero, (después de haberle realizado un Temple o un Normalizado) a una temperatura inferior al punto crítico (o temperatura de recristalización), seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretende resultados altos en tenacidad, o lentos, cuando se pretende reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones. [11] y [12]”

6. PRESUPUESTO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN

Tabla con valores unitarios de los insumos que requiere el proyecto, indicando las fuentes de financiación.

6.1. COSTO ESTIMADO

6.1.1. Costo Humano

- Tutor: profesor de planta de la Universidad Distrital encargado de seguir el desarrollo del proyecto y de guiar al desarrollador. También se encarga de corregir los documentos.
- Desarrollador: Encargado de ejecutar el proyecto, siguiendo las guías del tutor. Implementa el código y genera la documentación.

Se estima un promedio de 18 horas por semana para el desarrollador y dos horas por semana para el supervisor.

| Recurso | Costo | Vida útil (meses) | Tiempo de uso (meses) | Numero de equipos | Fuente de financiación | % de financiación |
|------------------|-----------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| Microsoft Office | \$ 650000 | Indet. | 4 | 2 | Universidad Distrital | 88.4% |
| Windows 10 | \$ 85000 | 24 | 4 | 2 | Universidad Distrital | 11.6% |
| Costo Total | \$ 735000 | | | | | 100% |

6.1.2. Recurso de Hardware

Corresponde a los programas que se utilizaran durante el desarrollo del proyecto, se estima su costo según su la duración estimada del proyecto.

| Recurso | Costo Mes | Tiempo de uso (meses) | Costo total | Fuente de financiación |
|------------------|------------|-----------------------|--------------|------------------------|
| Tiquetes aéreos. | \$ 900.000 | 1 | \$900.000 | Desarrollador |
| Viáticos | \$ 800.000 | 1 | \$800.000 | Desarrollador |
| Libros | \$ 60.000 | 4 | \$240.000 | Desarrollador |
| Transportes | \$240.000 | 4 | \$960.000 | Desarrollador |
| Ensayos | | | | Universidad Distrital |
| Total | | | \$ 2.900.000 | |

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. M. D. L. P. INTELLECTUAL, «OMPI,» 27 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.wipo.int/ipadvantage/es/details.jsp?id=3668>. [Último acceso: 10 Marzo 2018].
- [2] D. K. BHADESHIA, *Bainita en aceros, transformación, microestructura y propiedades*, Segunda ed., Londres: Universidad de Cambridge, 2001.
- [3] S. N. M. J, «La transformación bainítica sin formación de carburos en aceros,» *Universidad Complutense de Madrid. Centro de investigaciones Metalúrgicas*, 2006.
- [4] A. J. CORNIDE, «Aceros bainíticos avanzados: mecanismos de transformación y propiedades mecánicas. Madrid. Universidad Complutense de Madrid,» 2013.
- [5] V. G. A, *Los aceros avanzados*, Medellín: Universidad de Antioquia, 2005.
- [6] S. C. M., *Obtención y evaluación de las propiedades mecánicas del acero bainítico Fe-0.32C-1.45Si-1.97Mn-1.26Cr-0.26Mo-0.10 aleado con Boro*, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2011.
- [7] U. A. d. Madrid, «UAM Laboratotio de materiales,» [En línea]. Available: <https://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm>. [Último acceso: 02 marzo 2018].
- [8] M. C. Garcia y C. Francisca, «Superbainita: Una estructura bainítica de alta resistencia,» *Revista Metal*, 2005.
- [9] F. G. Caballero, B. D. H. K, K. J. A. Mawella y D. G. Jones, «Diseño de nuevos aceros bainíticos,» *Revista Metal*, 2005.
- [10] Y. Sotelo O, *Apuntes de clase "Procesos de manufactura"*, Universidad Distrital] Francisco Jose de Caldas. Bogotá, 2017.
- [11] E. C. d. Ingeniería, *Tratamientos Térmicos. Protocolo curso de Materiales*, Bogotá, 2008, p. 6.
- [12] d. C. Rodriguez y S. Reyes A, *Estructuras y tratamientos térmicos*, Universidad] Nacioal Autónoma de México. Cuautitlán Izcalli, 2012.